

論文の内容の要旨

論文題目	Renormalization of Electromagnetic Quantities in Small Josephson Junctions (微小Josephson接合系における電磁気量の繰り込み現象)
学位申請者	Kanyolo Godwill Mbiti

微小Josephson接合は、大きなJosephson接合とは、電流と電圧の役割あるいは電荷とフラックスの役割が入れ替わっているという意味において双対な系と考えられている。大きなJosephson接合は、その特有の非線形特性ゆえにマイクロ波デバイスや直流電圧の計量標準として重要な応用に用いられてきているが、同様な応用が微小Josephson接合にも期待されてきた。微小接合はその一方で環境との結合が強く、環境の揺らぎや環境の変化の影響を大きく受ける。そのため、微小接合の理論的な扱いは大きな接合に比べてはるかに複雑になるとともに、回路量子電磁力学に代表されるように、より豊かな物理現象を提供する場にもなっている。しかし、このような環境との結合の強さゆえに、これまで微小接合系自体に関する交流電磁場を用いた研究は、理論的にも実験的にもごく限られたものでしかなかった。

本論文は、単一接合と接合列を対象とし、印加される電磁場に対する電磁環境の効果に着目して、実験・理論の両面から、そこで起きる電磁現象の特徴を明らかにする効果には、電磁環境の効果が繰り込まれることを実験的にまた理論的に見出したものである。

第1章では上記のような研究背景と、微小Josephson接合・接合列の高周波印加下での振る舞いに関する過去の研究、またその理論的な扱いのこれまでの進展をまとめている。

第2章は、本論文の実験的な取り組みを記述した章である。上記の繰り込み効果の観測を目指し、接合面積  $0.02\text{ }\mu\text{m}^2$  程度のAl/AlO<sub>x</sub>/Al接合からなる微小Josephson接合の1次元配列を対象に、特性にCoulomb閉塞が現れる希釈冷凍温度

で行った高周波照射実験について述べている。接合列のCoulomb閉塞は、高周波のパワーの増大とともに徐々に縮小していくことが観測された。これはCooper対の光子援助トンネルによるものと理解された。その高い応答性から、微小Josephson接合列は、低温環境における高感度なオンチップのマイクロ波検出器として好適であることが指摘されている。また、観測された特性を古典領域の多光子吸収極限での理論と比較することによって、接合列に高周波が印加された際には、そのパワーに電磁環境の効果が繰り込まれることが明らかになった。これは、Josephson接合系における電磁気量の繰り込み効果を、印加交流電圧について初めて観測した事例になっている。

第3章から第5章では本論文の理論的な研究を述べている。第3章では、第2章の実験結果と後半の理論との関連を基礎づけるための理論的な見地を導入している。第4章では、微小トンネル接合・微小Josephson接合の記述のために開発されてきた、いわゆる位相相関理論あるいは $P(E)$ 理論が詳しくまとめられている。特に、微小Josephson接合の場合に、Caldeira-Legett型の環境インピーダンスを考慮したハミルトニアンから出発して、準粒子あるいはCooper対のトンネルハミルトニアンが摂動として扱える範囲で、電磁環境を取り入れたトンネル電流・超伝導電流の表式を得る過程を述べている。ただし、従来用いられてきたWick回転を使った虚時間での計算ではなく、後の章で有効になる実時間の経路積分法に基づいた手法を開発し、後の章の理論的な取り扱いの基礎としている。

第5章は、本論文の理論面での主要な章になっている。微小Josephson接合に交流電圧が印加された際の現象を理論的に詳細に解析している。Josephson接合の電磁環境は、印加される振動電圧の大きさに予測可能な様式でその効果が繰り込まれることを理論的に示している。この繰り込みは、波動関数の繰り込みにその起源を遡ることができる。ここでいう繰り込みとは、単一接合への高周波電磁場の効果が接合の静電容量と共に環境インピーダンスにも依存して変調を受けることを意味する。経路積分法による解析を通して、単一接合の場合について、交流電圧に電磁環境の効果が繰り込まれた光子援助トンネリングによる準粒子および超伝導電流の表式を導いている。さらに、無限長の接合列の場合について、接合列を再スケールされた環境インピーダンスをもつ接合と見る有効回路が構築され、単一接合の議論が敷衍される。そこでは電荷ソリトンと解釈できる粒子の励起が繰り込み因子を決めることを指摘しており、第2章の実験結果をよく説明できることを示している。

# 論文審査の結果の要旨

学位申請者氏名      Kanyolo Godwill Mbiti

審査委員主査      島田 宏

委員      水柿 義直

委員      小久保 伸人

委員      伏屋 雄紀

委員      加藤 岳生

微小Josephson接合は、大きなJosephson接合とは、電流と電圧の役割あるいは電荷とフラックスの役割が入れ替わっているという意味において双対な系と考えられている。大きなJosephson接合は、その特有の非線形特性ゆえにマイクロ波デバイスや直流電圧の計量標準として重要な応用に用いられてきているが、同様な応用が微小Josephson接合にも期待されてきた。微小接合はその一方で環境との結合が強く、環境の揺らぎや環境の変化の影響を大きく受ける。そのため、微小接合の理論的な扱いは大きな接合に比べてはるかに複雑になるとともに、回路量子電磁力学に代表されるように、より豊かな物理現象を提供する場にもなっている。しかし、このような環境との結合の強さゆえに、これまで微小接合系自体に関する交流電磁場を用いた研究は、理論的にも実験的にもごく限られたものでしかなかった。

本論文は、単一接合と接合列を対象とし、印加される電磁場に対する電磁環境の効果に着目して、実験・理論の両面から、そこで起きる電磁現象の特徴を明らかにすることを試みたものであり、交流電磁場が接合に与える効果には、電磁環境の効果が繰り込まれることを実験的にまた理論的に見出したものである。

第1章では、本研究の対象となるJosephson効果の基礎事項に始まり、上記の微小接合で現れる大きな接合との双対性についての理論的な基礎、その観測に向けた過去の取り組みがまとめられ、さらに、標準等への応用で興味をもたれる高周波・マイクロ波が照射された場合の過去の実験結果が、紹介されている。一方、微小接合での電磁環境の効果については、いわゆる位相相関理論あるいは $P(E)$ 理論が基礎となる。この理論が簡潔に紹介され、とくに接合列への適用性の難しさが述べられている。これらに基づいて、本研究の目的が述べられている。

第2章は、本論文の実験的な取り組みを記述した章である。上記の繰り込み効果の観測を目指し、接合面積  $0.02 \mu\text{m}^2$  程度のAl/AlO<sub>x</sub>/Al接合からなる微小Josephson接合の1次元配列を対象に、直流の電流電圧特性にCoulomb閉塞が現れる希釈冷凍温度で行った高周波照射実験について述べられている。接合列のCoulomb閉塞は、高周波のパワーの増大とともに徐々に縮小していくことが観測

された。これはCooper対の光子援助トンネルによるものと理解された。その高い応答性から、微小Josephson接合列は、低温環境における高感度なオンチップのマイクロ波検出器として好適であることが指摘されている。また、観測された特性を古典領域の多光子吸収極限での理論と比較することによって、接合列に高周波が印加された際には、そのパワーが繰り込まれることが明らかになった。これは、Josephson接合系における電磁気量の繰り込み効果を、印加交流電圧について初めて観測した事例になっている。ここでは、この交流電圧の繰り込みを接合列の電荷ソリトン長と結びつけて接合列の環境効果と結びつけている。

第3章では、第2章の実験と本論文後半の理論とを結びつけるために、一般に微小Josephson接合で電荷のトンネル過程に伴い発生する環境へのエネルギー放出を、2準位系の自然放出・誘導放出と結びつけた視点を提供している。微小Josephson接合を振動双極子とみなして、Caldeira-Legett型の環境インピーダンス模型を用いて繰り込み効果の起源を論じ、第4章以下の内容への接続を行っている。

第4章では、微小トンネル接合・微小Josephson接合の記述のために開発されてきた、 $P(E)$ 理論が詳しくまとめられている。特に、微小Josephson接合の場合に、Caldeira-Legett型の環境インピーダンスを考慮したハミルトニアンから出発して、準粒子あるいはCooper対のトンネルハミルトニアンが摂動として扱える範囲で、電磁環境を取り入れたトンネル電流・超伝導電流の表式を経路積分法に基づいて得る過程が詳細にまとめられており、後の章の理論的な取り扱いの基礎となっている。特に、従来の $P(E)$ 理論の構築に用いられていたWick回転による虚時間での計算ではなく、実時間での計算に基づいた手法が開発されて用いられている。この手法は、次の章で展開する接合列への拡張において有力な手法になっている。

第5章が、本論文の理論研究の主要部である。微小Josephson接合系に印加される交流電圧が接合系の電磁環境による繰り込み効果を受けることが、第1節では、単一接合について、経路積分法に基づいて示されている。その繰り込み因子が、インピーダンスのGreen関数に現れるLehmann密度に対応することが指摘されている。直流バイアスを受けた微小Josephson接合に交流電圧が印加された際の現象を、量子電磁力学との対応で議論し、最終的に、交流電圧に電磁環境の繰り込み効果を取り入れた光子援助トンネルに際した電流・電圧特性の表式を導いている。第2節では、それを1次元の多数接合列へ拡張し、接合列の有効模型に基づいて、電荷ソリトン描像に基づいた繰り込み因子に関連する物理量について導出し、それが第2章の実験結果に対応することを示している。

第6章では、本論文の実験および理論的な研究の結論と今後の展望が述べられている。

また、付録には、理論パートに関連した個別の計算方法や個別の基礎事項、また実験パートで用いた数値シミュレーション用に作成したプログラムが掲載されている。

以上のように、本論文は博士（理学）の学位論文として十分な価値を有するものと認める。